

MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU

ODRŽIVI RAZVOJ

TERMOTEHNIČKO INŽENJERSTVO



BRUNO TURK

IDEJNO RJEŠENJE MALE HIDROELEKTRANE

ZAVRŠNI RAD

ČAKOVEC, 2016.

MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU

ODRŽIVI RAZVOJ

TERMOTEHNIČKO INŽENJERSTVO

BRUNO TURK

IDEJNO RJEŠENJE MALE HIDROELEKTRANE

**PRELIMINARY DESIGN STUDY OF A MICRO
HYDROPOWER PLANT**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Pred. dr. sc. Stanislav Sviderek, dipl. ing.

ČAKOVEC, 2016.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru pred. dr. sc. Stanislavu Svidereku, dipl. ing. na pruženoj pomoći za vrijeme izrade ovog završnog rada i Centru kompetencije za obnovljive izvore energije (CKOIE) koji mi je omogućio potrebne materijale.

Također se zahvaljujem svojim roditeljima i obitelji koji su bili velika podrška tijekom studiranja.

SADRŽAJ

1	UVOD	1
2	MALE HIDROELEKTRANE	2
2.1	Dijelovi male hidroelektrane.....	3
3	IZVEDBE MALIH HIDROELEKTRANA	6
3.1	Niskotlačne MHE sa strojarnicom na dnu brane	7
3.2	Niskotlačne MHE sa sifonskim odvodom	8
3.3	MHE integrirane unutar kanala za navodnjavanje.....	9
3.4	MHE ugrađena u vodoopskrbni sustav	11
4	TURBINE ZA MALE HIDROELEKTRANE.....	12
4.1	Francis turbina	12
4.2	Kaplan turbina.....	13
4.3	Propelerna turbina.....	14
4.4	Arhimedov vijak	15
5	IDEJNI PROJEKT MALE HIDROELEKTRANE.....	16
5.1	Hidrološki podaci rijeke Orljave.....	16
5.2	Krivulja trajanja protoka rijeke Orljave	17
5.3	Proračun postojećeg derivacijskog kanala MHE Brestovac	19
5.4	Kapacitet postojećeg dovodnog kanala.....	20
5.5	Proračun potrebnih dimenzija dovodnog kanala.....	21
5.6	Proračun potrebnih dimenzija odvodnog kanala.....	23
5.7	Geodetski pad u ovisnosti o protoku.....	24
5.8	Odabir turbine za MHE Brestovac.....	25
5.9	Stupanj korisnosti postrojenja.....	28
5.10	Proizvodnost male hidroelektrane Brestovac	29
6	ZAKLJUČAK	31
7	LITERATURA.....	32
8	PRILOZI.....	33

POPIS SLIKA

- Slika 1.** Princip sistema male hidroelektrane
- Slika 2.** Niskotlačna MHE s korištenjem postojeće brane
- Slika 3.** Niskotlačna MHE - sifonski odvod
- Slika 4.** MHE integrirane unutar kanala za navodnjavanje
- Slika 5.** MHE integrirane unutar kanala za navodnjavanje
- Slika 6.** MHE ugrađena u vodoopskrbni sustav
- Slika 7.** Francis turbina
- Slika 8.** Kaplan turbina
- Slika 9.** Propelerna turbina
- Slika 10.** Arhimedov vijak
- Slika 11.** Satelitska snimka lokacije male hidroelektrane
- Slika 12.** Srednji dnevni protoci rijeke Orljave za razdoblje 1998. - 2011. - mjerna postaja Požega
- Slika 13.** Krivulja trajanja protoka rijeke Orljave, mjerna postaja Požega
- Slika 14.** Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka kanala trapezoidnog oblika
- Slika 15.** Ovisnost kapaciteta dovodnog kanala o protočnoj dubini
- Slika 16.** Ovisnost odvodnog kanala o protočnoj dubini
- Slika 17.** Ovisnost geodetskog pada o protoku
- Slika 18.** Dijagram područja primjene turbina
- Slika 19.** Kaplan turbina promjenjive geometrije za malu hidroelektranu
- Slika 20.** Ovisnost protoka i stupnja iskorištenja turbine

Slika 21. Ovisnost protoka i snage turbine

Slika 22. Stupanj korisnosti postrojenja MHE Brestovac prema dostupnim podacima za komercijalno dobavljive turbine

Slika 23. Protok turbine ($Q=3 \text{ m}^3/\text{s}$) i krivulja trajanja protoka na lokaciji MHE Brestovac

POPIS TABLICA

Tablica 1. Ulazni podaci za proračun odvodnog i dovodnog kanala

Tablica 2. Vrijednosti koeficijenata u formuli (5)

Tablica 3. Pretpostavke za proračun dovodnog kanala

Tablica 4. Konačne dimenzije dovodnog kanala

Tablica 5. Pretpostavke za proračun odvodnog kanala

Tablica 6. Konačne dimenzije odvodnog kanala

Tablica 7. Tehničke karakteristike turbine

Tablica 8. Radne karakteristike odabrane turbine pri $H=4.5$ m i $N=325$ min⁻¹

SAŽETAK

Male hidroelektrane se, za razliku od srednjih i velikih, prihvatljivije uklapaju u životnu sredinu te gotovo da i nemaju negativan utjecaj na okruženje u kojem se nalaze. Uzrokuju minimalne i zanemarive poremećaje u životnoj sredini. Male hidroelektrane se prvenstveno koriste za proizvodnju električne energije, a postoji i opcija njihove ugradnje u sustav opskrbe naselja i industrije vodom, ili navodnjavanja.

Male hidroelektrane potpomažu izravnavanju prirodnih nereguliranih voda. Spriječavaju i smanjuju eroziju tla te time usporavaju zasipanje velikih akumulacija, produljuju im životni vijek trajanja, povećavaju upotrijebljivost i profitabilnost. Svojim postojanjem, male hidroelektrane pomažu u razvoju poljoprivrede i privrede kao i stočarstva, ratarstva, uzgoja riba, sporta, turizma i rekreacije. Male hidroelektrane osiguravaju zajamčeni biološki minimum i smanjuju odlazak stanovništva iz nerazvijenih područja u gusto naseljene industrijske zone.

U radu je opisan princip rada male hidroelektrane, izvedbe malih hidroelektrana te idejni projekt male hidroelektrane Brestovac. Izrađen je proračun odabrane lokacije na osnovu prikupljenih podataka o srednjim dnevnim protocima i geodetskom padu.

Ključne riječi: *mala hidroelektrana, derivacijski kanal, Kaplan turbina*

ABSTRACT

Micro hydropower plants are more suitable for the environment, on which they have no negative impact compared to small and large hydropower plants. They cause minimum and negligible disturbance in the environment. Basic function of the micro hydropower plants is to generate electricity, but they have an additional function when they are installed in the supply system of settlements and water industry, or irrigation system.

Micro hydropower plants contribute to the regulation (equalization) of natural non-regulated water. They also prevent and reduce soil erosion and thereby slowing down the large storage reservoirs, extend their life span, increase usage and profitability. Micro hydropower plants contribute to development of agriculture and industry as well as development of cattle breeding, farming, fishing, sports, tourism and recreation. Micro hydropower plants ensure a guaranteed biological minimum and reduce migration of the population of underdeveloped areas into densely populated industrial areas.

The paper describes the working principle of micro hydro power plants, its construction and preliminary design of micro hydropower Brestovac. Budget for selected location has been made based on collected data of mean daily flow rates and geodetic decline.

Keywords: *micro hydropower plants, derivation channel, Kaplan turbine*

1 UVOD

Hidroelektrane su energetska postrojenja u kojima se potencijalna energija vode pomoću turbine pretvara u mehaničku (kinetičku) energiju, koja se u električnom generatoru koristi za proizvodnju električne energije. Hidroelektranu u širem smislu čine i sve građevine i postrojenja koje služe za prikupljanje (akumuliranje), dovodenje i odvođenje vode (brana, zahvati, dovodni i odvodni kanali, cjevovodi, itd.), pretvorbu energije (turbine, generatori), transformaciju i razvod električne energije (rasklopna postrojenja, dalekovodi) te za smještaj i upravljanje cijelim sustavom (strojarnica i sl.). Iskorištavanje energije vodnog potencijala ekonomski je konkurentno proizvodnji električne energije iz fosilnih i nuklearnog goriva, zato je hidroenergija najznačajniji obnovljivi izvor energije (predstavlja 97% energije proizvedene svim obnovljivim izvorima).

U zadnjih trideset godina proizvodnja u hidroelektranama je utrostručena, a njen udio povećan je za 50%. Ti podaci pokazuju da se proizvodnja u hidroelektranama brzo povećava iz više razloga: hidroenergija je čista, nema otpada, nema troškova goriva (voda je besplatna) pod uvjetom da je ima u dovoljnoj količini, moderne hidroelektrane mogu i do 90% energije vode pretvoriti u električnu energiju, puštanje hidroelektrane u pogon vrlo je brzo te se koriste za pokrivanje naglih povećanja potrošnje; umjetna jezera nastala izgradnjom hidroelektrana lokalno doprinose ekonomiji i omogućavaju navodnjavanje, vodoopskrbu, turizam i rekreaciju.

Hidroenergija ipak značajno zaostaje za proizvodnjom u nuklearnim ali i termoelektranama. Razlog takvom stanju leži u činjenici da iskorištavanje hidroenergije ima, također bitna tehnička i prirodna ograničenja.

Hidroenergija, za razliku od ostalih načina iskorištavanja obnovljivih izvora energije, nema problema s nedostatkom potrebne tehnologije već nedostatkom potrebnih lokacija. Za razliku od kapitalnih projekata kojih je sve manje, još uvijek je dovoljno projekata malih hidroelektrana, kod kojih su rizici lošeg utjecaja na okoliš mnogo manji, a energetske potrebe i sigurnost investicije mnogo veće [1].

2 MALE HIDROELEKTRANE

Nacionalni energetske programi energetske efikasnosti i korištenja energije obnovljivih izvora pokrenuti su u ožujku 1997. godine odlukom Vlade RH. Jedan od tih programa je Nacionalni energetske program izgradnje malih hidroelektrana - Program MAHE. Temeljni cilj tog programa je omogućavanje svih uvjeta za povećanu izgradnju malih hidroelektrana u RH. Osnovni parametar po kojim se definira mala hidroelektrana u svim zemljama je instalirana snaga. Malim hidroelektranama se smatraju hidroelektrane u rasponu od donje granice instalirane snage do 5 kW (NR Kina), do gornje granice 30 MW (SAD). U RH je definirana donja granica koja iznosi 10 kW, a gornja granica iznosi 10000 kW.

Glavne komponente male hidroelektrane:

- Građevinski objekti
- Hidromehanička oprema
- Elektrostrojarska oprema
- Priključak na dalekovodnu mrežu

Pretvorba potencijalne energije nekog vodotoka sa određenim geodetskim padom u električnu energiju, glavni je cilj male hidroelektrane. Snaga male hidroelektrane je proporcionalana protoku i geodetskom padu između gornje i donje površine vodotoka.

Male hidroelektrane mogu se svrstati prema geodetskom padu u tri kategorije:

- Visoki pad: 100 m i više
- Srednji pad: 30 - 100 m
- Niski pad: 2 - 30 m

Na osnovu konfiguracije lokacije i vodotoka dijele se na:

- Protočne elektrane
- Postrojenja sa strojarnicom u podnožju brane
- Postrojenja integrirana u kanalu za navodnjavanje
- Postrojenja integrirana u sklopu vodozahvata

Odabir tipa hidroelektrane ponajprije ovisi o redu morfološkim karakteristikama pozicije, urbanističkim zahtjevima, ekološkim zahtjevima i drugim faktorima.

Instalirani kapacitet hidroelektrane ovisi o padu i instaliranom protoku, odnos dimenzija dijelova postrojenja može se definirati izravno u odnosu prema padu i instaliranom protoku. To su osnovni uvjeti kojima se treba obratiti pažnja kod utvrđivanja dimenzija, tipizacije objekta i opreme za male hidroelektrane.

Strojarnica male hidroelektrane može se, ali i ne mora smjestiti uz samu branu.

Pozicija strojarnice u odnosu na samu branu, male hidroelektrane se dijele na:

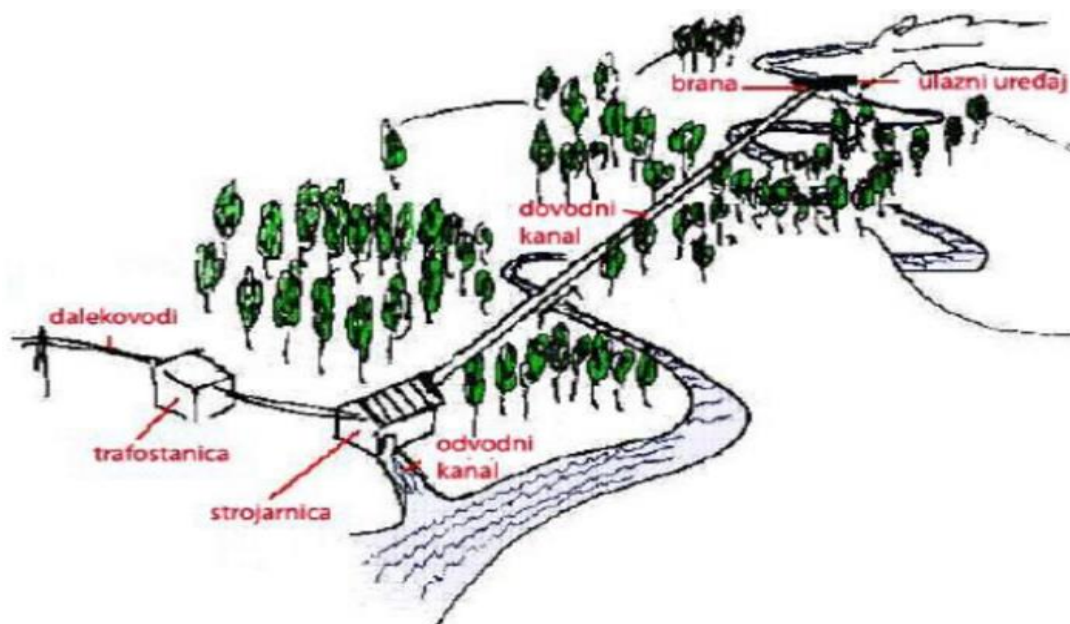
- Pribranske
- Derivacijske s otvorenim kanalom
- Derivacijske s zatvorenim kanalom
- S tlačnim cjevovodom

2.1 Dijelovi male hidroelektrane

Mala hidroelektrana se sastoji od svih objekata i dijelova koji služe za skupljanje, dovodenje i odvođenje vode za pretvorbu mehaničke energije u električnu energiju, te za transformaciju i razvod električne energije. Karakteristični dijelovi male hidroelektrane se razlikuju prema:

- Brana ili pregrada
- Zahvat
- Dovod
- Vodna komora
- Tlačni cjevovod
- Strojarnica
- Odvod vode

Neki od dijelova mogu se potpuno izostaviti, a u drugim slučajevima može isti dio preuzeti više funkcija. Sve to ovisi o tipu hidroelektrane (Slika1).



Slika 1. *Princip sistema male hidroelektrane [2]*

Pregrade ili brane služe za skretanje vode s njezinoga prirodnog toka prema zahvatu hidroelektrane radi povišenja razine vode, postizanjem boljeg pada i ostvarivanja akumulacije.

Pregradom zaustavljenu vodu zahvat upućuje prema hidroelektrani. Postoje dva tipa zahvata, zahvat na površini i zahvat ispod površine. Vodna komora i zahvat spajaju se dovodom koji može biti izgrađen kao kanal ili tunel. Izvedba tunela može biti kao tlačni ili gravitacijski tunel.

Za vođenje vode iz vodne komore do turbine zaslužan je tlačni privod. Najčešće izvedbe tlačnog privoda su od čelika, a za manje padove od betona. Profil privoda uglavnom je trapeznog oblika, izvodi se u kanalima i rovovima čija se konstrukcija izvodi tako da se postignu najmanji hidraulički gubici.

Na kraju dovoda nalazi se vodna komora čije dimenzioniranje ima velik utjecaj na pravilno funkcioniranje hidroelektrane.

Generatori zajedno s turbinama nalaze se u strojarnici. Izvedba hidrogeneratora je pretežno u vertikalnoj izvedbi radi ekonomičnije izvedbe hidrauličnog dijela elektrane. U

postrojenjima manje snage susrećemo se sa hidrogeneratorima s horizontalnim osovinama, tj. kad dvije Pelton ili Francis turbine pogone jedan generator.

Zaporni uređaj se postavlja na ulazu u tlačni cjevovod koji ima sigurnosnu ulogu. U slučaju kao pukne cijev, on automatski spriječava daljnji dotok vode. Postavljanje uređaja na dnu tlačnog cjevovoda uvelike ovisi o broju turbina koje su spojene na jedan cjevovod.

Pogonski stroj za pretvorbu potencijalne energije u kinetičku, a zatim promjenu količine gibanja u radnom kolu u mehaničku energiju vrtnje naziva se vodna turbina. Vratilo turbine spojeno je sa generatorom u kojem se mehanička energija obrtanja pretvara u električnu energiju

S obzirom na način pretvorbe energije i prema promjeni tlaka vode pri strujanju kroz radno kolo, vodne turbine dijele se na: pretlačne (reakcijske) i turbine slobodnog mlaza (akcijske, impulsne turbine).

Turbine u kojima je tlak na ulazu u rotor veći od onoga na njegovom izlazu nazivaju se pretlačnim turbinama. U tim se turbinama dio potencijalne energije transformira u kinetičku energiju u statoru, a dio u rotoru. Promjena količine gibanja i reaktivnih sila uzrokuje se zakretanjem radnog kola. U pretlačne turbine ubrajaju se Francisova, Kaplanova, Propelerna i Deriazova turbina.

U turbinama slobodnog mlaza, tlak na ulazu u rotor jednak je tlaku na izlazu iz rotora jer se u statoru turbine sva potencijalna energija pretvara u kinetičku energiju. Zbog skretanja mlaza u radnom kolu zakretna sila nastaje samo na temelju promjene količine gibanja. U turbine slobodnog mlaza ubrajamo Pelton, Turgo i Banki - Mitchell turbina.

3 IZVEDBE MALIH HIDROELEKTRANA

Da bi se hidroelektrana smatrala malom hidroelektranom, sa ciljem zaštite okoliša, pod samim pojmom se kategoriziraju energetske objekti koji iskorištavaju hidropotencijal, a istovremeno imaju sljedeća svojstva:

- Karakterizira ih protočni rad ili iznimno mala akumulacija (minimiziran utjecaj na vodotok)
- Paralelan rad sa mrežom i ugradnja asinkronih generatora - kod objekata sa instaliranom snagom manjom od 100 kW nema gradnje trafostanice već se predviđa izvedba transformatora na stupu
- Postrojenje se sastoji od brane (niskog preljevnog praga), dovodnog kanala i/ili cjevovoda, zgrade strojarnice i odvodnog kanala
- Preljevni prag služi samo zato da uspori vodotok prije ulaska u dovodni kanal
- Umjesto niskog preljevnog kanala može se upotrijebiti tzv. tirolski zahvat
- Dovodni kanal zatvorenog tipa predviđen je samo za vođenje zahvaćene vode po strmim obroncima i većim dijelom je ukopan (može biti i potpuno ukopan)
- Dovodni kanal otvorenog tipa predviđen je za veće količine vode i u pravilu se nalazi na manje strmim terenima
- Tlačni cjevovod treba biti što manjih dimenzija i predviđen je da vodu najkraćim putem dovede do strojarnice
- Zgrada strojarnice je što manjih gabarita i operacija je u potpunosti automatizirana
- Odvodni kanal je otvoren i kratak i njime se voda vraća iz strojarnice u vodotok (ova voda je gotovo redovito jako obogaćena kisikom, tako da se ribe rado zadržavaju u ovom području).

Ako se pri kategorizaciji i projektiranju malih hidroelektrana drži ovih načela utjecaji na okoliš su svedeni na minimum [2].

3.1 Niskotlačne MHE sa strojarnicom na dnu brane

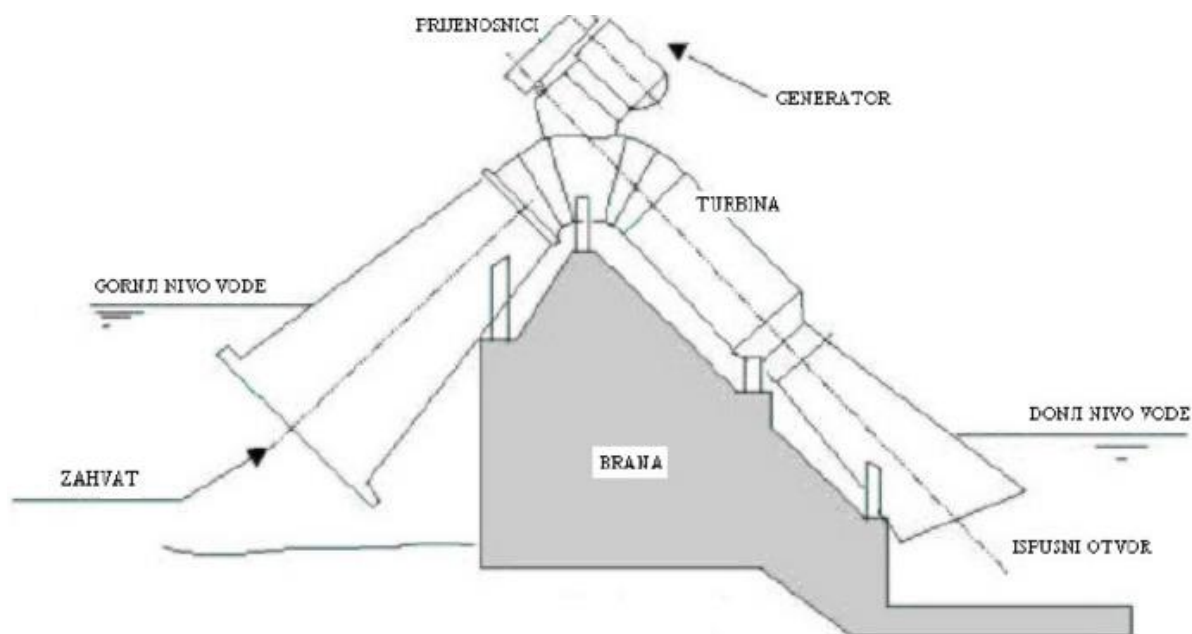
Male hidroelektrane si ne mogu priuštiti gradnju velikih rezervoara ili akumulacija da se koriste zalihama vode kada je to najpogodnije. Cijena izgradnje relativno velike brane bi bila preskupa i ekonomski neisplativa. Ali ako je akumulacija već izgrađena za druge svrhe, kao što su zaštita od poplave, navodnjavanje, prikupljanje vode za velike gradove, područja i slično, moguće je proizvoditi električnu energiju koristeći postojeći odvod ili prirodni tok rezervoara (akumulacije). Ako brana već ima ispusni otvor moguća je izvedba MHE prikazana na slici 2.



Slika 2. Niskotlačna MHE s korištenjem postojeće brane [2]

3.2 Niskotlačne MHE sa sifonskim odvodom

U slučaju da brana nije previsoka može se ugraditi sifonski dovod. Integralni sifonski dovod omogućuje elegantnu izvedbu postrojenja, najčešće do visine 10 m i za postrojenja do 1000 kW, iako postoje postrojenja sa sifonskim dovodom sa instaliranom snagom do 11 MW (Švedska) i visine do 30.5 m (SAD). Turbine mogu biti smještene na vrhu brane ili na nizvodnoj strani (Slika 3).

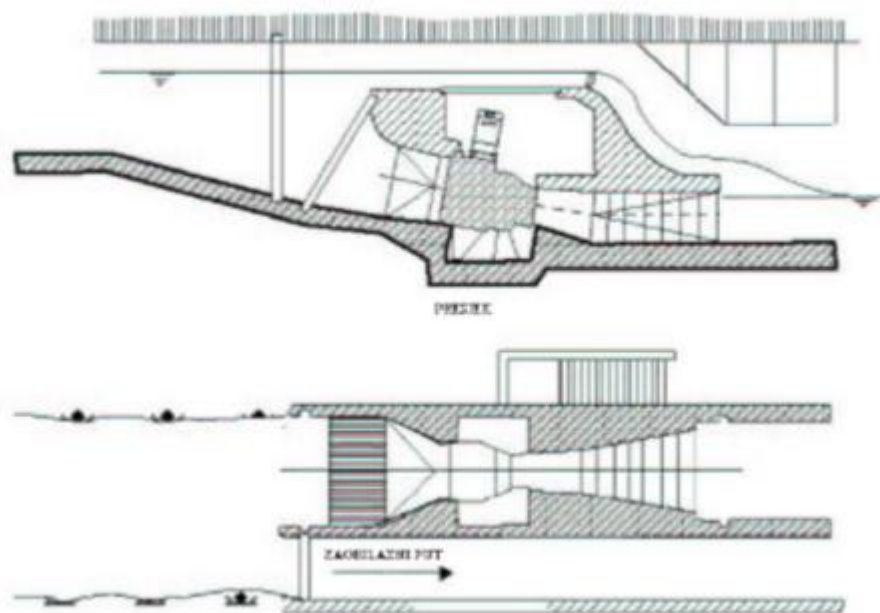


Slika 3. Niskotlačna MHE - sifonski odvod [2]

3.3 MHE integrirane unutar kanala za navodnjavanje

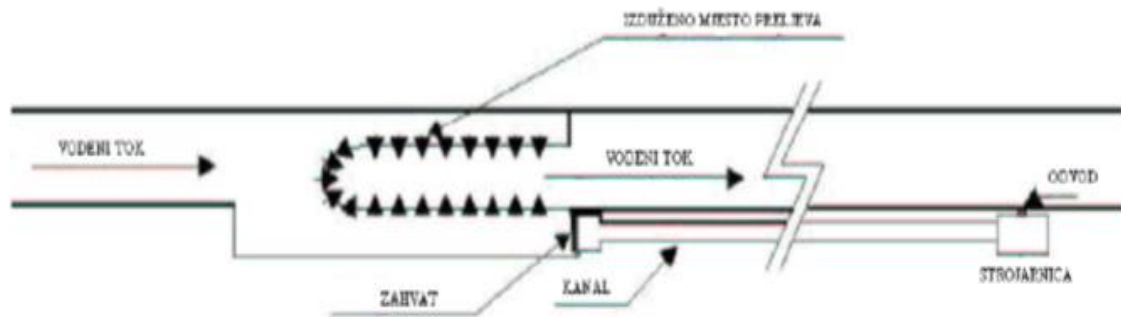
Postoje dvije izvedbe malih hidroelektrana koje koriste kanal za navodnjavanje:

1. Ako je kanal dovoljno velik za smještaj zahvata, strojarnice, odvoda i bočnog obilaza za vodu. Slika 4 prikazuje izvedbu takve vrste sa uronjenom strojarnicom opremljenom sa desno kutnom pogonskom Kaplanovom turbinom. Da bi osigurali opskrbu vode za natapanje izvedba mora sadržavati bočni obilaz u slučaju gašenja turbine. Ovakva izvedba zahtjeva projektiranje istovremeno kada i projektiranje kanala za natapanje, jer bi ugrađivanje u kanal koji je već u funkciji mogla biti vrlo skupa opcija.



Slika 4. *MHE integrirane unutar kanala za navodnjavanje [2]*

2. Ako kanal već postoji, pogodna opcija prikazana je na slici 5. Kanal bi trebalo neznatno povećati za smještaj zahvata i preljeva. Da se širina zahvata reducira na minimum, treba ugraditi izduženi preljev. Od zahvata se voda kroz tlačni cjevovod dovodi do turbine, a zatim se kroz kratki ispust vraća u kanal. Uglavnom u kanalima nema migracije riba pa su prolazi za ribe nepotrebni.

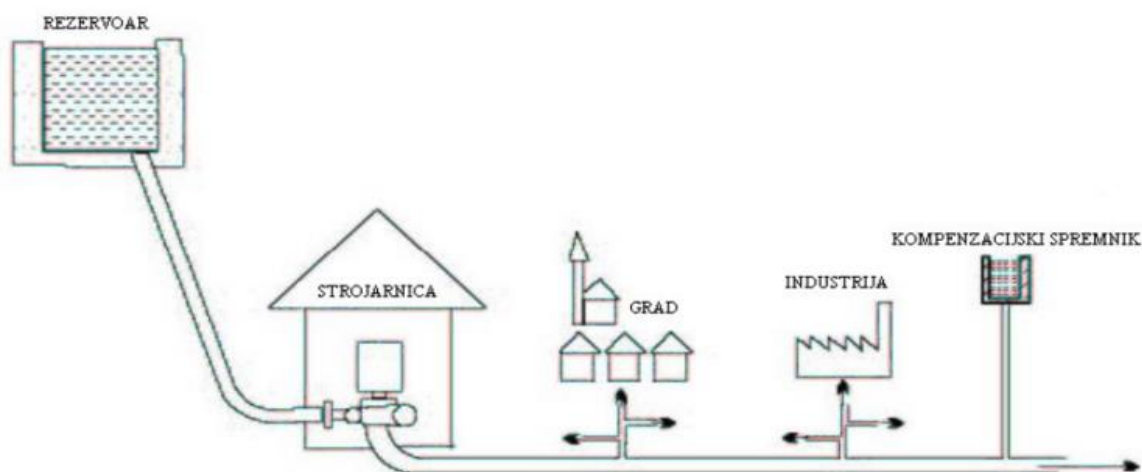


Slika 5. MHE integrirane unutar kanala za navodnjavanje [2]

3.4 MHE ugrađena u vodoopskrbni sustav

Voda za piće se isporučuje u grad transportom vode iz povišenog rezervoara kroz cjevovod pod tlakom. Uobičajeno, u takvim vrstama instalacije disipacija energije na nižem kraju cjevovoda, na ulasku u postrojenje za pročišćavanje vode, se ublažava korištenjem specijalnih ventila.

Smještanjem turbine na kraj cjevovoda (Slika 6), da pretvori ionako izgubljenu energiju u električnu, je zgodna opcija, pod uvjetom da se izbjegne vodeni udar. Da bi se osigurala trajna opskrba vodom mora biti ugrađen sustav obilaznih ventila. U nekim vodoopskrbnim sustavima turbina ima ispušni otvor u otvoreni bazen ili jezero. Sustav za kontrolu održava nivo vode u bazenu. U slučaju mehaničkog zastoja ili zastoja turbine, sustav obilaznih ventila također može održavati razinu vode u bazenu. U slučaju da glavni obilazni ventil ispadne iz pogona pojavljuje se nadtlak, te se pomoćni obilazni ventil brzo otvori. Kontrolni sustavi su još složeniji u sustavima gdje je izlaz iz turbine podvrgnut protu tlaku vodene mreže.



Slika 6. MHE ugrađena u vodoopskrbni sustav [2]

4 TURBINE ZA MALE HIDROELEKTRANE

Uloga turbine je pretvorba kinetičke energije vode u mehaničku energiju rotirajućih dijelova turbine odnosno lopatica. Zbog različitih kombinacija protoka i pada postoji više različitih tipova turbina kako bi se pokrio širok raspon uvjeta koji proizlaze iz konfiguracija terena. Kod malih hidroelektrana kod kojih protoci značajno variraju odabiru se one turbine koje rade efikasno u širokim granicama protoka kao što su:

- Francis turbina
- Kaplan turbina
- Propelerna turbina
- Arhimedov vijak

4.1 Francis turbina

Francisove turbine koriste se za srednje padove, kod kojih provodni dio s lopaticama okreće kotač. U provodnom dijelu Francis turbine potencijalna energija vode se samo djelomično pretvara u kinetičku, tako da s određenim pretlakom dopijeva u obrtno kolo te njemu predaje svu svoju energiju. Dovod vode u turbinu omogućuje spirala koja promjenom poprečnog presjeka treba osigurati pravilnu distribuciju vode na svome izlazu. Na samome izlazu iz rotora, voda se difuzorom odvodi u odvodni kanal i time povećavajući ukupnu iskoristivost turbine (Slika 7).



Slika 7. *Francis turbina* [3]

4.2 Kaplan turbina

Kaplanove turbine koriste se za niske padove, one rade slični kao i Francisove turbine mada im je broj lopatica daleko manji. Broj lopatica kod Kaplan turbine varira od 4 do 8, odnosno što je manji pad to je broj lopatica manji. Možemo reći da je to propelerna turbina sa zakretljivim rotorskim lopaticama. Zakretanjem regulacijskih rotorskih lopatica moguće je osigurati visoku korisnost u širokom radnom području.

Kaplan turbine spadaju u red aksijalnih hidrauličnih strojeva s primjenom pri malim padovima i velikim protocima. Difuzor vrši transport vode iz rotora, koji smanjenjem izlazne energije povećava ukupnu iskoristivost turbine (Slika 8).



Slika 8. *Kaplan turbina* [4]

4.3 Propelerna turbina

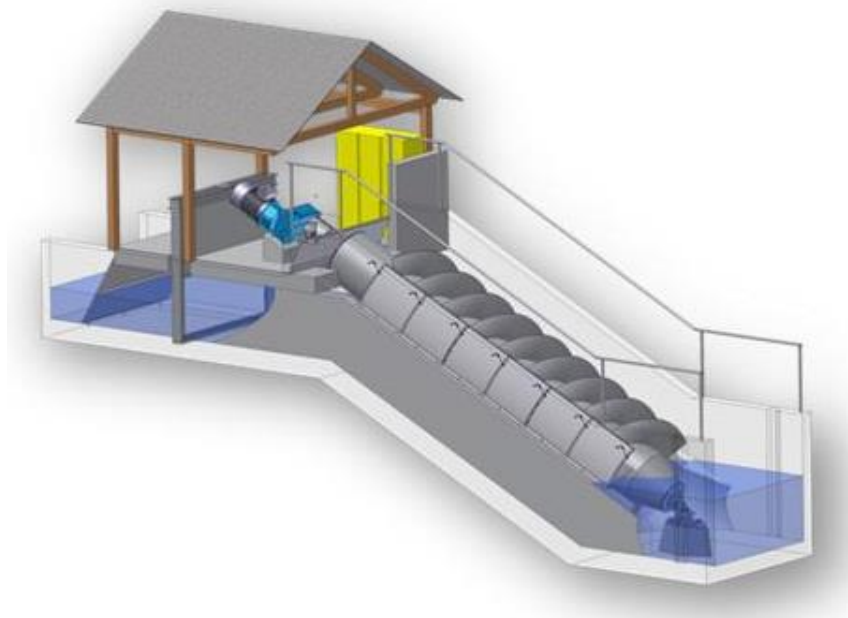
Propelerna turbina je gotovo jednaka kao i Kaplan turbina, međutim kod propelerne turbine lopatice radnog kola su u većini slučajeva fiksne. Voda se dovodi aksijalno na lopatice rotora te se koristi za velike protoke i male padove (Slika 9).



Slika 9. *Propelerna turbina* [5]

4.4 Arhimedov vijak

Arhimedov hidrodinamički vijak se već od nekad koristi za crpljenje vode. Već odavno je poznata ova tehnologija. Inverzni rad hidrodinamičkog Arhimedovog vijka koristi se za proizvodnju električne energije pogotovo kod malih hidroelektrana. Za to je potreban vodni potencijal koji je procijenjen od strane samog toka vode. Kombinacijom Arhimedovog vijka i generatora pretvara se mehanička energija u električnu energiju (Slika 10).



Slika 10. *Arhimedov vijak* [6]

5 IDEJNI PROJEKT MALE HIDROELEKTRANE

5.1 Hidrološki podaci rijeke Orljave

Rijeka Orljava je glavni odvodni recipijent Požeške kotline. Rijeka teče duž kotline smjerom zapad - istok, naglo zakreće kod Pleternice prema jugu gdje prima svoju najveću pritoku Londžu. Nadalje Orljava teče smjerom prema jugu, prolazi savskom ravnicom, gdje kao i lijevi prtok utječe u Savu kod sela Slavonski Kobaš.

Izvorište Orljave sastoji se od dva ogranka, od kojih jedan dolazi ispod Psunja, a drugi iz papuka kod Zvečeva te se spajaju kod sela Kamensko.

Dolina rijeke Orljave prepuna je plodnih površina, uglavnom pjeskovitog šljunka, gline i prapora. Protočne doline prepune su aluvijalnih naslaga. S obzirom na strminu terena i razvedenost dolina okolnih brda, proces dubinskih erozija prisutan je u čitavom slivu. Posljedica erozije su znatne količine vučenog nanosa raznih granulacija, što ovisi o dužini potoka, visinskoj razlici i o geološkoj podlozi (Slika 11).

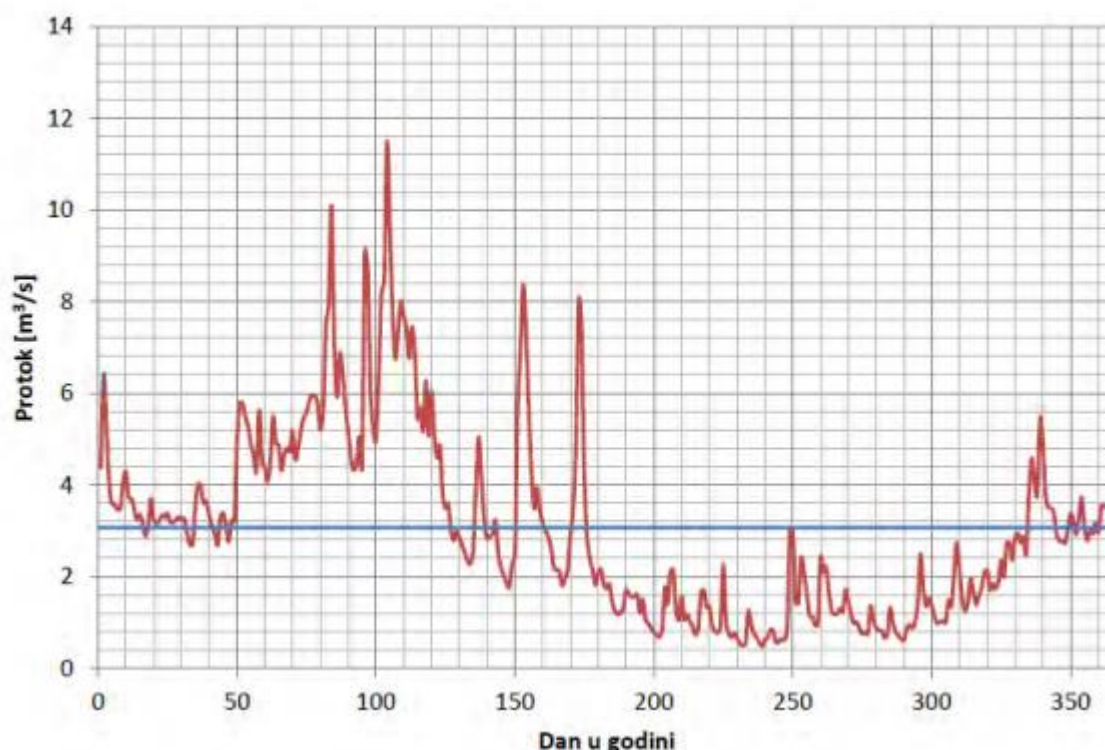
Ukupna površina sliva rijeke Orljave iznosi 1.616 km² na ušću u rijeku Savu, te 754 km² na ušću rijeke Londže u Orljavu. Visinska razlika rijeke Orljave je 730 m na dužinu koja iznosi oko 95 km.



Slika 11. Satelitska snimka lokacije male hidroelektrane [7]

5.2 Krivulja trajanja protoka rijeke Orljave

Podaci o protoku za razdoblje od 1998. do 2011. godine (mjerna postaja Požega) preuzeti su iz studije *Hidrološka analiza sliva Orljave s novelacijom rješenja zaštite od poplava* (Vodoprivredno - projektni biro d.d., Zagreb, srpanj 2012. godine) (Slika 12).



Slika 12. Srednji dnevni protoci rijeke Orljave za razdoblje 1998. - 2011. - mjerna postaja Požega [7]

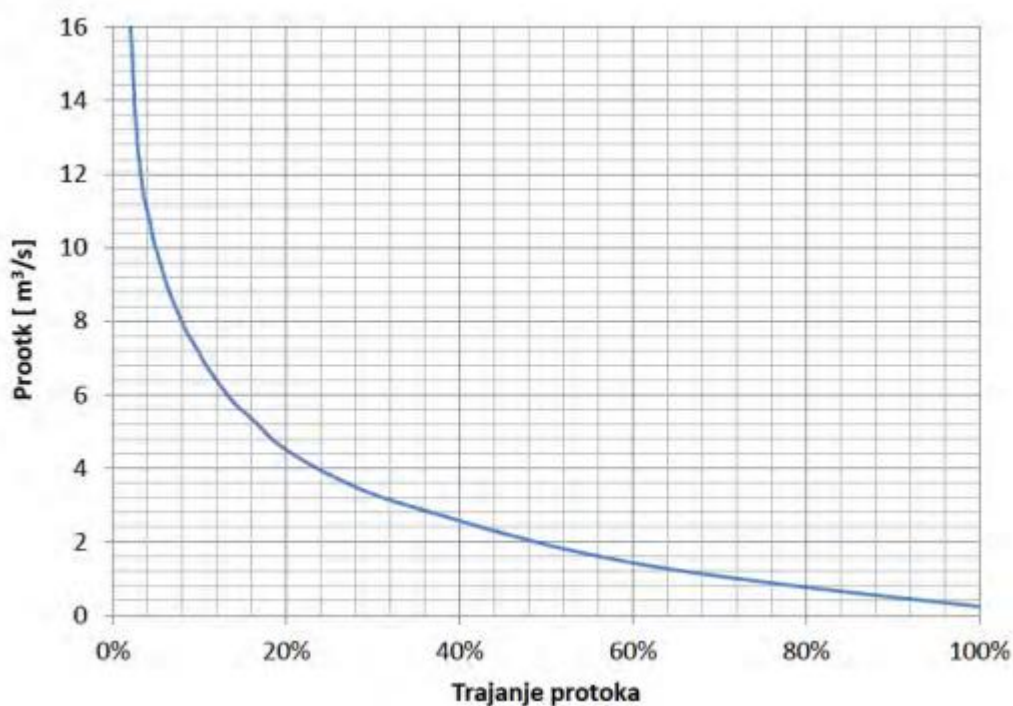
Ovoj mjernoj postaji gravitira ukupna slivna površina od 431,16 km², dok je površina sliva gravitirajuća zahvatu derivacijskog kanala za MHE Brestovac 386,57 km². Na osnovu toga, protoke iz raspoloživih podataka trebalo bi korigirati s koeficijentom:

$$k = \frac{386,57}{431,16} = 0,8966 \quad (1)$$

Unatoč tome usvajaju se srednji dnevni protoci i krivulja vjerojatnosti dobivena iz navedenih podataka s mjerne stanice u Požegi, jer je na ulazu u Požegu između MHE Brestovac i stanice Požega upojna zona i vodocrpilište pitke vode. Oko 10% protoka rijeke Orljave, upojnom se zonom upušta u podzemlje te zahvaća u vodoopskrbni sustav

Požestine. Na osnovu toga mjerni protoci na stanici u Požegi odgovaraju i stvarnim protocima u profilu MHE Brestovac i neće doći do odstupanja.

Na osnovu dobivenih srednjih protoka dobiveni su maksimalni ($11,922\text{m}^3/\text{s}$), minimalni ($0,488\text{m}^3/\text{s}$) i prosječan dnevni protok ($3\text{m}^3/\text{s}$) te je na osnovu dobivenih podataka razvijena krivulja trajanja protoka na razmatranoj mjernoj postaji (Slika 13). Iz dobivene krivulje trajanja protoka očitava se vjerojatnost pojave srednjeg protoka 32% (32% vremena godišnje će protok iznositi minimalno $3\text{m}^3/\text{s}$). Unatoč tome očitavaju se i protoci 50% - tnog trajanja ($1,94\text{m}^3/\text{s}$) te protok 80% - tnog trajanja ($0,77\text{m}^3/\text{s}$). Na osnovu gore navedenih podataka određuje se nazivni protok male hidroelektrane [7].



Slika 13. Krivulja trajanja protoka rijeke Orljave, mjerna postaja Požega [7]

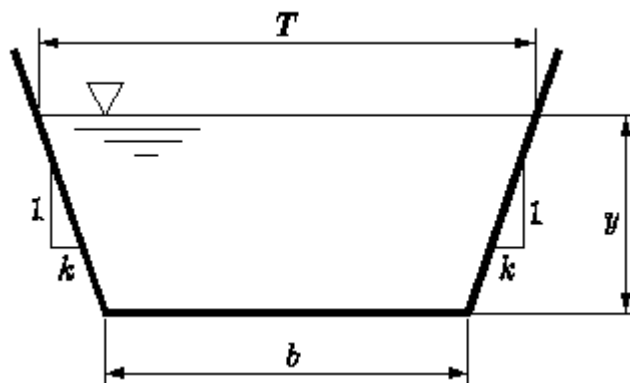
5.3 Proračun postojećeg derivacijskog kanala MHE Brestovac

Derivacijski kanal male hidroelektrane Brestovac sastoji se od dovodnog kanala, odvodnog kanala te pomoćnog ispusta. Dovodnim kanalom transportira se voda od postojeće brane u koritu rijeke Orljave do strojarnice hidroelektrane. Odvodnim kanalom vraća se iskorištena voda u korito rijeke Orljave. Ušće odvodnog kanala nalazi se oko 1,3 km nizvodno od brane te se pomoćnim ispustom smještenim neposredno ispred strojarnice prema potrebi vraća voda iz dovodnog kanala izravno u korito Orljave, zaobilazeći strojarnicu i odvodni kanal.

Tablica 1. Ulazni podaci za proračun odvodnog i dovodnog kanala

Veličina	Oznaka	Mjerna veičina	Vrijednost
Geodetska visina (kota) preljeva brane	Z_{br}	m.n.v.	162.72
Duljina krune brane	L_{br}	m	24
Duljina dovodnog kanala	L_1	m	660
Širina dna dovodnog kanala	b_1	m	6
Nagib bokova kanala	k_1	-	1.5:1
Geodetska visina dna na početku kanala	z_{11}	m.n.v.	162.26
Geodetska visina dna na kraju kanala (praga turbinske komore)	z_{12}	m.n.v.	161.44
Geodetska visina vrha fine rešetke na kraju kanala	-	m.n.v.	162.39
Duljina odvodnog kanala	L_2	m	560
Širina dna odvodnog kanala	b_2	m	6
Nagib bokova kanala	k_2	-	1.5:1
Geodetska visina dna na početku kanala (izlaz iz zgrade mlina)	z_{21}	m.n.v.	158.0
Geodetska visina dna na kraju kanala (ušće u korito Orljave)	z_{22}	m.n.v.	156.6

Geodetskim snimanjem određene su geodetske visine postojećih kanala i objekata MHE Brestovac. Dno na ulazu dovodnog kanala smješteno je 0,5 m ispod krune brane. Kanali su zpušteni te ih treba detaljno očistiti od vegetacije i nakupljenog mulja te prema potrebi proširiti i izdubiti prije puštanja male hidroelektrane u pogon (slika 14).



Slika 14. Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka kanala trapezoidnog oblika

5.4 Kapacitet postojećeg dovodnog kanala

Geodetski pad postojećeg dovodnog kanala jednak je razlici kota dna na ulazu i kraju kanala:

$$\Delta z_1 = z_{11} - z_{12} = 162.26 - 161.44 = 0.82 \text{ m} \quad (2)$$

Nagib dna kanala iznosi:

$$S_0 = \frac{\Delta z_1}{L_1} = \frac{0.82}{660} = 0.00124 \quad (3)$$

Maksimalna dubina vode u postojećem dovodnom kanalu određena je kotama prelijeva brane i dna kanala u ulazu:

$$y_n = z_{br} - z_{11} = 162.72 - 162.26 = 0.46 \text{ m} \quad (4)$$

Manningov koeficijent trenja:

$$n = m_5 * (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) = 0.030 \quad (5)$$

Tablica 2. Vrijednosti koeficijenata u formuli (5):

Materijal	zemlja	n_0	0.2
Stupanj nepravilnosti	glatko	n_1	0.0
Promjena presjeka kanala	postepena	n_2	0.0
Utjecaj prepreka	zanemariv	n_3	0.0
Vegetacija	slaba	n_4	0.01

Stupanj meandriranja	nizak	n ₄	1.0
----------------------	-------	----------------	-----

Kapacitet kanala jednak je volumnom protoku uniformnog toka, koji za kanal trapezoidnog poprečnog presjeka, konstantnog nagiba dna S_0 iznosi:

$$Q = \frac{1}{n} * \frac{[(b+k*y_n)*y_n]^{\frac{5}{3}}}{(b+2*y_n*\sqrt{1+k^2})^{\frac{2}{3}}} * \sqrt{S_0} = \frac{1}{0.030} * \frac{[(6.0+1.5*0.46)*0.46]^{\frac{5}{3}}}{(6.0+2*0.46*\sqrt{1+1.5^2})^{\frac{2}{3}}} * \sqrt{0.00124} = 1.96 \frac{m^3}{s} \quad (6)$$

5.5 Proračun potrebnih dimenzija dovodnog kanala

Tablica 3. Pretpostavke za proračun dovodnog kanala

Kota na ulazu dovodnog kanala	H _{br}	m.n.v.	162.60
Kota razine na kraju dovodnog kanala (kota gornje vode)	H _g	m.n.v.	162.20
Duljina dovodnog kanala	L ₁	m	635
Širina dna dovodnog kanala	b ₁	m	6
Nagib stanica	k	-	1.5
Manningov koeficijent (zemljani kanal)	n	-	0.030

Raspoloživi geodetski pad dovodnog kanala:

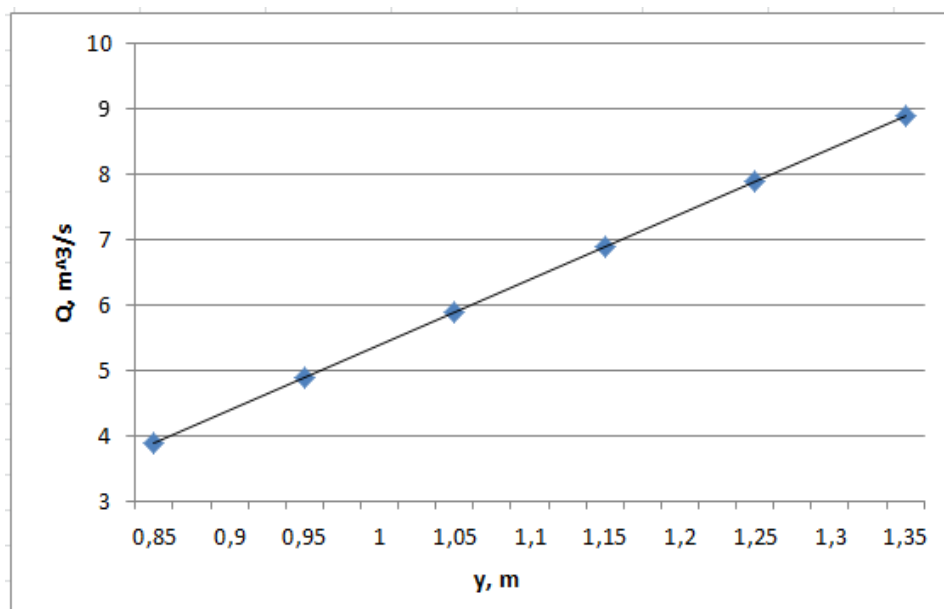
$$\Delta h_1 = H_{br} - H_g = 162.60 - 162.20 = 0.4 \text{ m} \quad (7)$$

Nagib vodenog lica kanala iznosi:

$$S = \frac{\Delta h_1}{L_1} = \frac{0.4}{635} = 0.00063 \quad (8)$$

Kapacitet kanala pri dubini vode $y = 1.25$ m (Slika 15) iznosi:

$$Q = \frac{1}{n} * \frac{[(b+k*y)*y]^{\frac{5}{3}}}{(b+2*y*\sqrt{1+k^2})^{\frac{2}{3}}} * \sqrt{S} = \frac{1}{0.030} * \frac{[(6.0+1.5*1.25)*1.25]^{\frac{5}{3}}}{(6.0+2*1.25*\sqrt{1+1.5^2})^{\frac{2}{3}}} * \sqrt{0.00063} = 7.88 \frac{m^3}{s} \quad (9)$$



Slika 15. Ovisnost kapaciteta dovodnog kanala o protočnoj dubini

Minimalna dubina vode u dovodnom kanalu koja osigurava transport potrebne količine vode iznosi $y_1 = 1.32$ m.

Kota dna dovodnog kanala na ulazu:

$$z_{11} = H_{br} - y_1 = 162.6 - 1.32 = 161.28 \text{ m} \quad (10)$$

Kota dna dovodnog kanala na kraju:

$$z_{12} = H_g - y_1 = 162.2 - 1.32 = 160.88 \text{ m} \quad (11)$$

Tablica 4. Konačne dimenzije dovodnog kanala

Kota dna na ulazu dovodnog kanala	z_{11}	m.n.v.	161.28
Kota dna na kraju dovodnog kanala	z_{12}	m.n.v.	160.88
Duljina dovodnog kanala	L_1	m	635
Uzdužni nagib	S_0	-	$6.3 \cdot 10^{-4}$
Širina dna dovodnog kanala (baze trapezoidnog presjeka)	b_1	m	6
Nagib stranica	k	-	1.5:1

5.6 Proračun potrebnih dimenzija odvodnog kanala

Tablica 5. Pretpostavke za proračun odvodnog kanala

Kota razine na početku odvodnog kanala (donja voda)	H_d	m.n.v.	157.80
Kota dna na kraju kanala (ušću)	z_{22}	m.n.v.	156.60
Duljina odvodnog kanala	L_2	m	548
Geodetski pad kanala	Δh_2	m	0.4
Širina dna odvodnog kanala	b_2	m	6
Nagib stranica	k	-	1.5
Manningov koeficijent (zemljani kanal)	n	-	0.030

Uz zadržavanje postojeće širine kanala i zadane kote dna na kraju kanala, kota dna na početku kanala (uz jednaki geodetski pad kao u slučaju dovodnog kanala, $\Delta h_2 = \Delta h_1 = 0.4$ m):

$$z_{21} = z_{22} + \Delta h_2 = 156.60 + 0.4 = 157 \text{ m} \quad (12)$$

Produbljenje na početku kanala u odnosu na postojeće stanje:

$$\Delta z_{21} = 158 - 157 = 1 \text{ m} \quad (13)$$

Uzdužni nagib kanala iznosi:

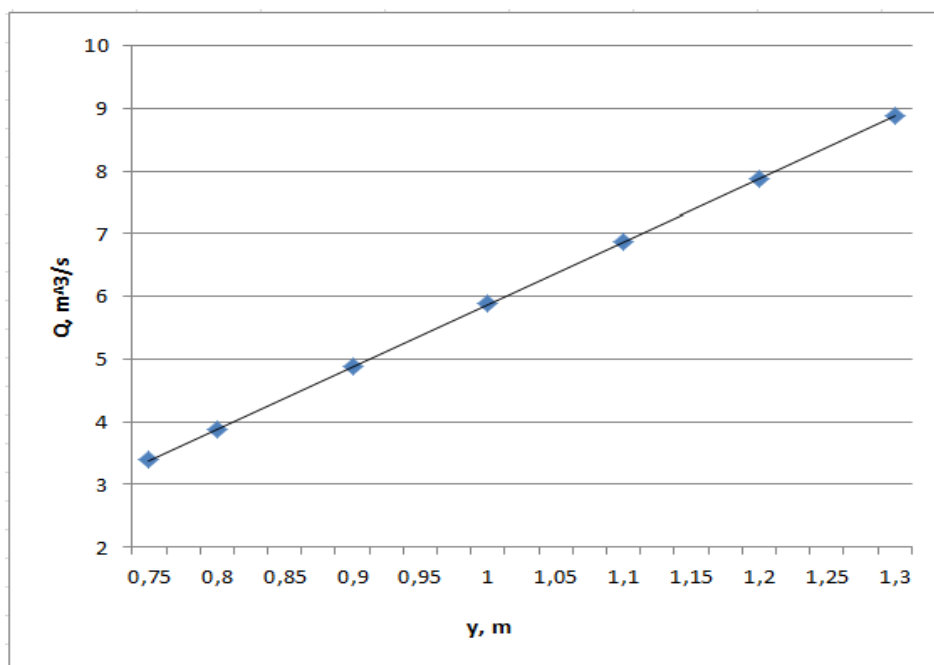
$$S_0 = \frac{\Delta h_2}{L_2} = \frac{0.4}{548} = 0.00073 \quad (14)$$

Dubina vode pri nominalnoj geodetskoj visini donje vode:

$$y_2 = H_d - z_{21} = 157.80 - 157 = 0.8 \text{ m} \quad (15)$$

Protok odvodnog kanala pri dubini vode $y_2 = 0.80$ m (Slika 16) iznosi:

$$Q = \frac{1}{n} * \frac{[(b+k*y)*y]^{\frac{5}{3}}}{(b+2*y*\sqrt{1+k^2})^{\frac{2}{3}}} * \sqrt{S_0} = \frac{1}{0.030} * \frac{[(6.0+1.5*0.80)*0.80]^{\frac{5}{3}}}{(6.0+2*0.80*\sqrt{1+1.5^2})^{\frac{2}{3}}} * \sqrt{0.00073} = 3.88 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (16)$$



Slika 16. Ovisnost odvodnog kanala o protočnoj dubini

Tablica 6. Konačne dimenzije odvodnog kanala

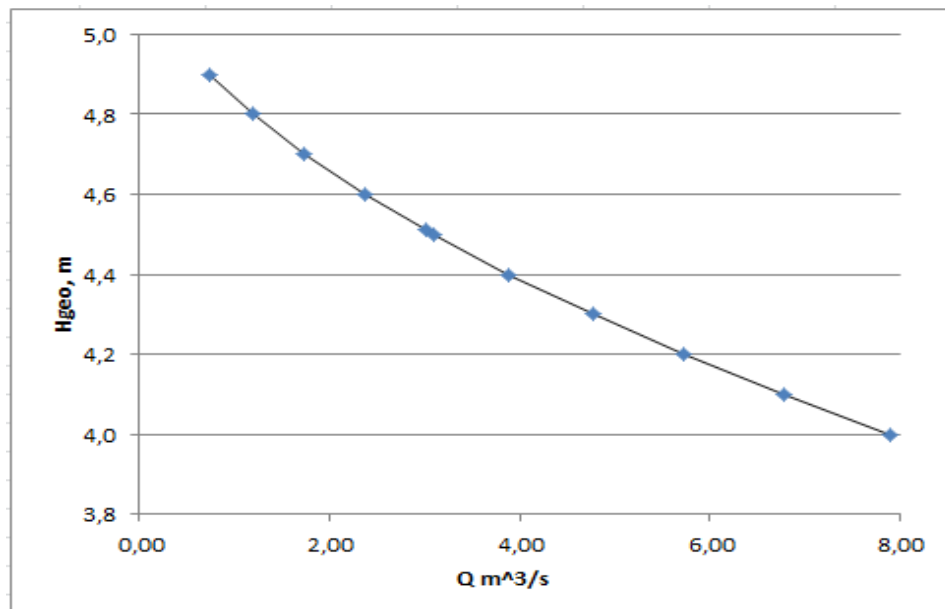
Kota dna na ulazu kanala	z_{21}	m.n.v.	157
Kota dna na kraju kanala	z_{22}	m.n.v.	156.6
Duljina odvodnog kanala	L_2	m	548
Uzdužni nagib	S_0	-	$7.3 \cdot 10^{-4}$
Širina dna odvodnog kanala (baze trapetoidnog presjeka)	b_2	m	6
Nagib stranica	k	-	1.5:1

5.7 Geodetski pad u ovisnosti o protoku

Raspoloživi geodetski pad elektrane jednak je razlici kota gornje i donje vode:

$$H_{geo} = H_g - H_d = H_g - (z_{21} + y_2) = 162.2 - (157 + 0.80) = 4.5 \text{ m} \quad (17)$$

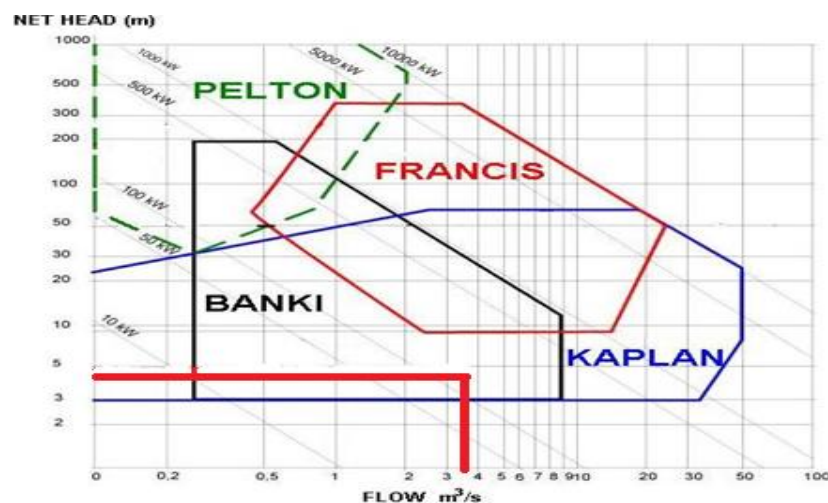
U radu elektrane razina donje vode mijenja se ovisno o protoku a kota gornje vode održava se na konstantnom maksimumu. Uz pretpostavku neometanog izlivanja vode iz odvodnog kanala u korito Orljave, na slici 17 prikazana je ovisnost geodetskog pada elektrane o protoku.



Slika 17. Ovisnost geodetskog pada o protoku

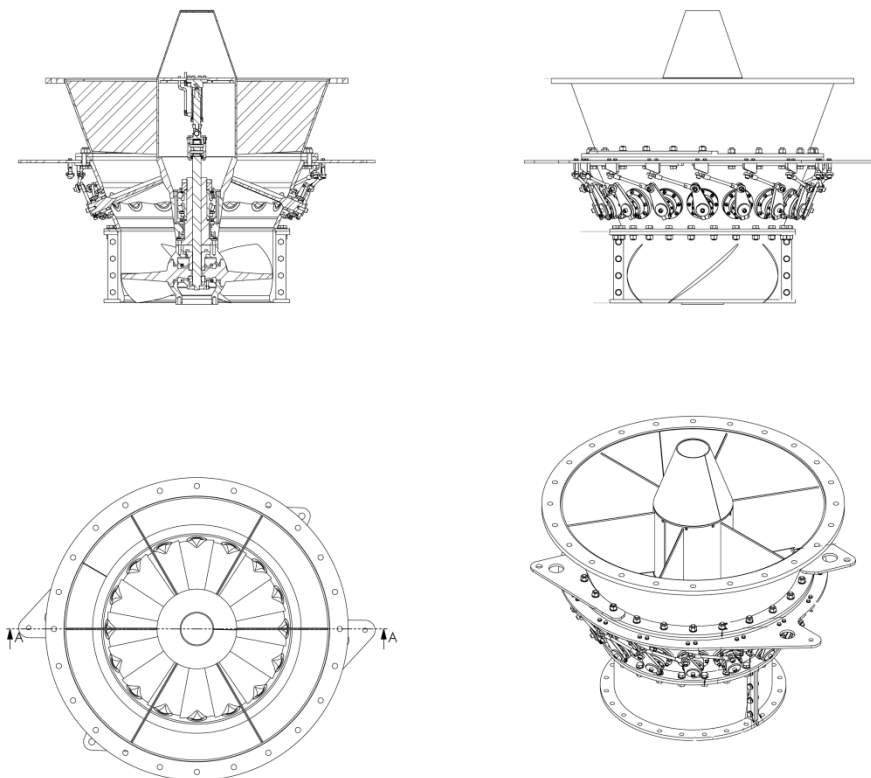
5.8 Odabir turbine za MHE Brestovac

Na osnovu dobivenog prosječnog protoka i geodetskog pada ($Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}$, $H_{\text{geo}} = 4.5 \text{ m}$), iz slike 18 odabiremo vrstu turbine čije područje rada pokriva dobivene vrijednosti. Prema dijagramu, moguće je korištenje Kaplan i Banki turbine, no zbog relativno niskog pada i veće proizvodnosti male hidroelektrane odabire se turbina tipa Kaplan.



Slika 18. Dijagram područja primjene turbina [8]

Preporučena snaga turbine (Slika19) određena je na osnovu raspoloživog potencijala lokacije uz pretpostavku da srednji dnevni protok prema krivulji trajanja protoka iznosi 3 m³/s i nazivni neto pad na turbini 4.5 m. Uz te parametre nazivna snaga male hidroelektrane trebala bi iznositi oko 119.3 kW.



Slika 19. Kaplan turbina promjenjive geometrije za malu hidroelektranu

Na osnovu raspoloživih geodetskih podataka definiran je nazivni pad male hidroelektrane uz pretpostavljeno produbljivanje odvodnog kanala 1 m ispod i uz nazivni protok. Turbina je uvijek projektirana na nešto niži nazivni protok iz razloga da bi se u periodima s manjim protokom moglo proizvoditi što više električne energije, ujedno može raditi i s većim protokom od nazivnog koji iznosi $Q_{\max} = 4.09 \text{ m}^3/\text{s}$.

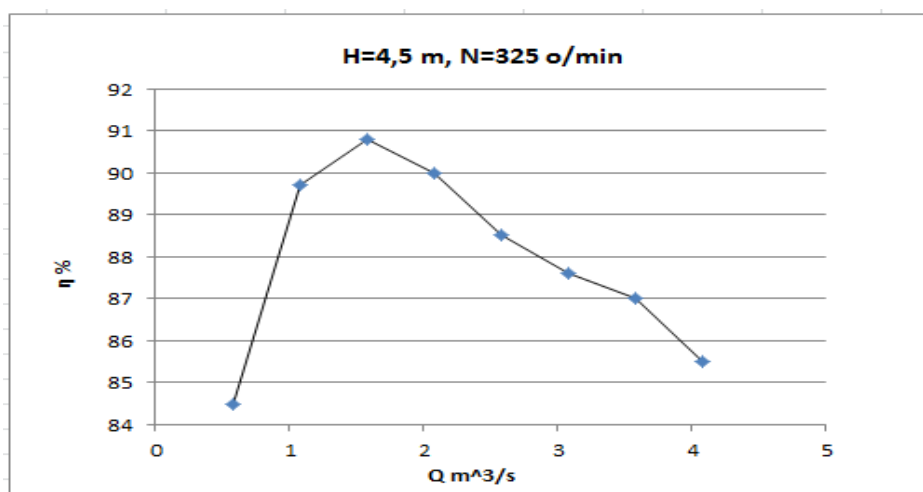
Tablica 7. Tehničke karakteristike turbine

Tip turbine	Kaplan turbina aksijalna	
Nazivni protok	3	m ³ /s
Nazivni bruto pad	4.5	m
Stupanj korisnosti (pri nazivnom protoku i padu)	87.6	%
Nazivna snaga turbine	119.3	kW
Promjer turbine	1000	mm
Nazivni broj okretaja turbine	325	min ⁻¹

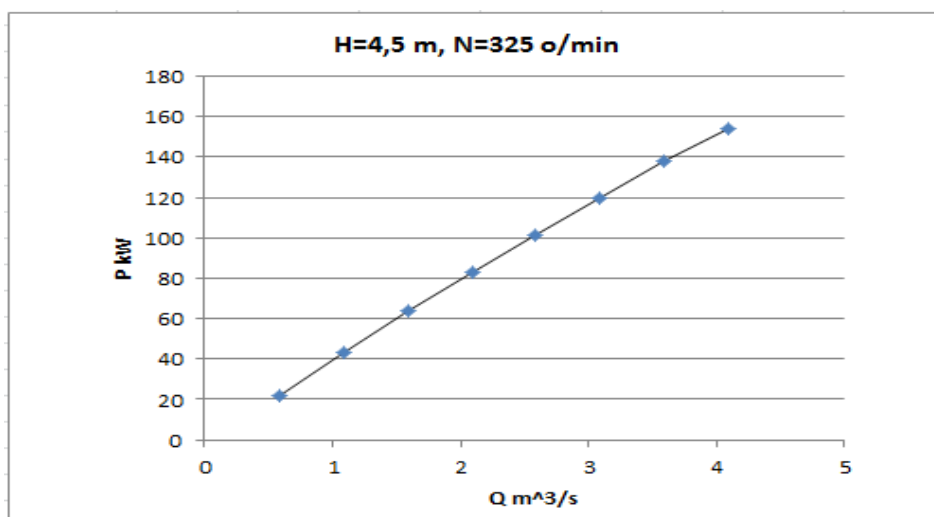
Tablica 8. Radne karakteristike odabrane turbine pri H=4.5 m i N=325 min⁻¹

Q	m ³ /s	0.59	1.09	1.59	2.09	2.59	3.09	3.59	4.09
η	%	84.5	89.7	90.8	90.0	88.5	87.6	87.0	85.5
P	kW	22.1	43.2	63.7	83.0	101.1	119.3	137.7	154.1

Na slici 20 i 21 vidimo ovisnost protoka i stupnja iskorištenja turbine, te ovisnost protoka i snage turbine. U tom rasponu snage koristi se najčešće asinhroni generator sa 3 para polova i nominalne brzine vrtnje od 1000 o/min, te se zbog toga za prijenos snage s turbine na generator koristi remenski prijenos odgovarajućeg prijenosnog omjera.



Slika 20. Ovisnost protoka i stupnja iskorištenja turbine



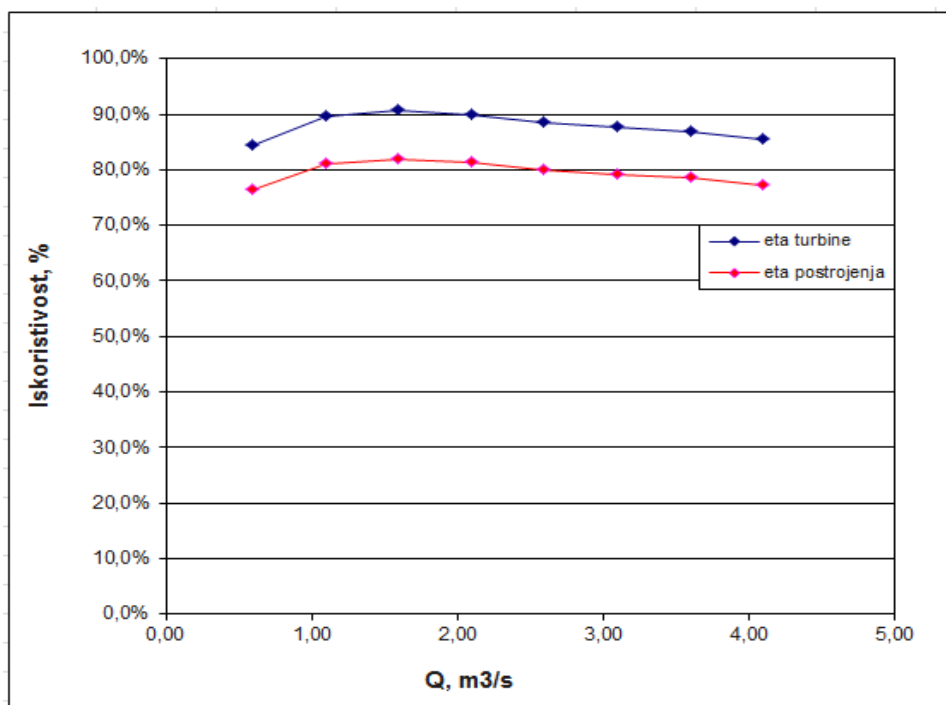
Slika 21. Ovisnost protoka i snage turbine

5.9 Stupanj korisnosti postrojenja

Na osnovu odabrane opreme moguće je definirati ukupni stupanja korisnosti cijelog postrojenja, odnosno približno odrediti sve gubitke koji se javljaju u procesu pretvorbe potencijalne energije vode u električnu energiju. Kod utvrđivanja stupnja korisnosti postrojenja uzeti su podaci proizvođača opreme. Stupanj korisnosti postrojenja (Slika 22) sa zadanim parametrima dijelova male hidroelektrane u koje spadaju cijevovod, turbina, ulazni aparat, itd., funkcija je protoka kroz malu hidroelektranu.

$$\eta_{\text{postrojenja}} = \eta_{\text{turbine}} * \eta_{\text{remena}} * \eta_{\text{generatora}} \% \quad (18)$$

Stupanj djelovanja modernih asinhronih elektromotora visoke iskoristivosti u rasponu snage veće od 100 kW kreće se oko 95% [9], a da se u generatorskom režimu može očekivati čak i malo bolji stupanj djelovanja [10]. U katalogu Gates je vidljivo da se stupanj djelovanja zupčastih remena kreće u rasponu od 94% do 96% [11]. Prednost korištenja zupčastog remena u odnosu na plosnati remen je kompaktnija izvedba i daleko niža sila napinjanja remena jer se pogonska sila ne prenosi trenjem već zahvatom zuba remena i remenice.



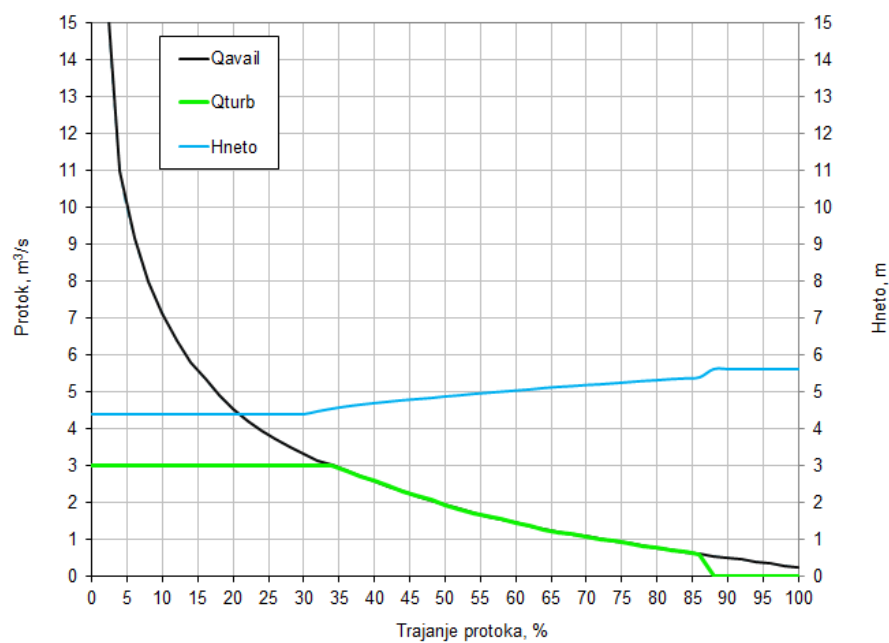
Slika 22. Stupanj korisnosti postrojenja MHE Brestovac prema dostupnim podacima za komercijalno dobavljive turbine

5.10 Proizvodnost male hidroelektrane Brestovac

Na osnovu dijagrama protoka i trajanja protoka te geodetskog pada, može se izračunati koliko bi energije proizvela mala hidroelektrana za prosječnu godinu (Slika 23). Proizvedena energija računa se integracijom protoka u ovisnosti trajanja protoka te geodetskog pada prema izrazu:

$$P = \eta * Q * H * \rho * g = [W] \quad (19)$$

Sumiranjem dobivenih rezultata određenih točaka izračunato je da bi mala hidroelektrana u Brestovcu godišnje proizvela 554 MWh električne energije.



Slika 23. Protok turbine ($Q=3 \text{ m}^3/\text{s}$) i krivulja trajanja protoka na lokaciji MHE Brestovac

6 ZAKLJUČAK

Male hidroelektrane sa suvremenim standardiziranim rješenjima za opremanje i izvođenje, lako i brzo se konstruiraju, održavaju i funkcioniraju. Unatoč standardnom elektromehaničkom opremom i građevinskim radovima, male hidroelektrane iziskuju minimalne tehničke i organizacijske uvjete za upravljanje, cijena izvođenja i održavanja je minimalna, a samim time investirani kapital se brzo povraća. Preporuka za izgradnju male hidroelektrane je da se uzme već postojeća lokacija.

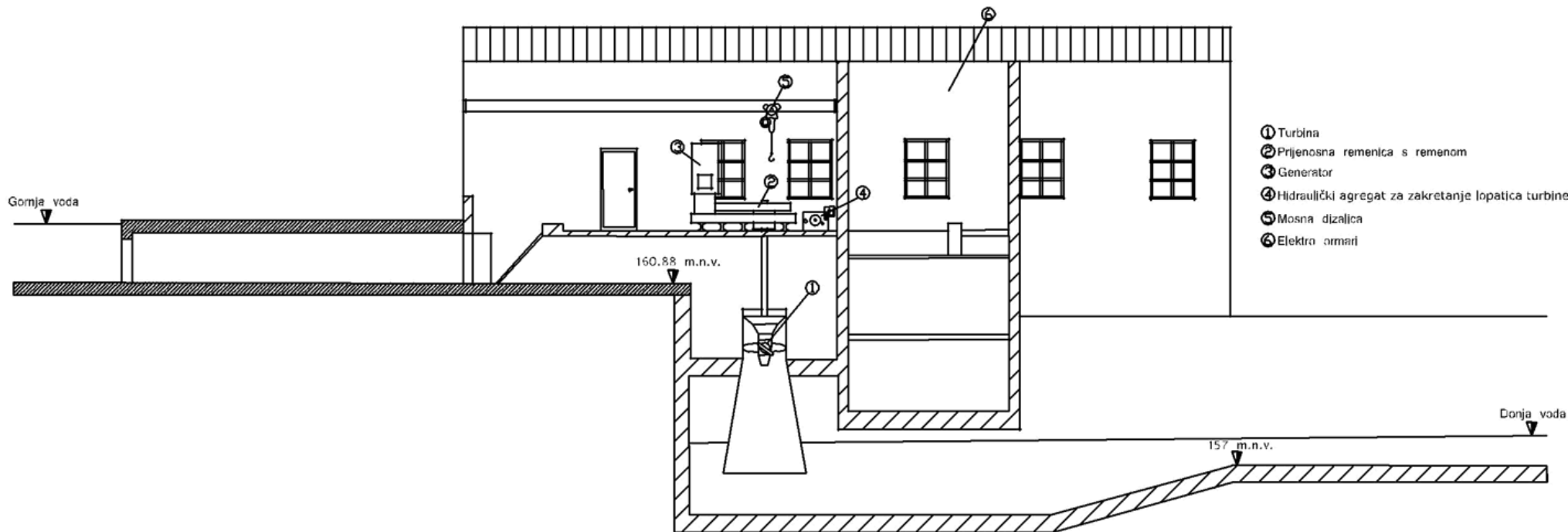
Mala hidroelektrana Brestovac je izgrađena na lokaciji starog mlina iz razloga što već postoji potrebna papirologija vezana uz građevinu. Gradnja male hidroelektrane na lokaciji gdje nema prethodnog objekta iziskuje mnogo građevinskih dozvola koje mogu produljiti ili ugroziti projekt.

Izgradnja malih hidroelektrana u RH oslanja se na veliko prirodno bogatstvo vodama. Od velike koristi u razvoju i davanju važnosti malim hidroelektranama je pozitivna pravna regulativa i poticaji za financiranje izgradnje malih hidroelektrana. Postojanje što većeg broja malih hidroelektrana pomaže stabilizaciji i ekonomskom razvoju, ublažava energetske krize i što je najvažnije nema štetnih utjecaja na okoliš.

7 LITERATURA

- [1] Rajković, D. (2011). "Proizvodnja i pretvorba energije". Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, str. 49 - 50.
- [2] Halilović, N. "Proračun malih hidroelektrana".
<http://documents.tips/documents/proracun-malih-he.html>
- [3] <http://www.hydrotu.com/supplier-11594-francis-hydro-turbine>
- [4] <http://www.hydrotu.com/supplier-11594-francis-hydro-turbine>
- [5] http://www.xindaenergy.com/html_news/Classification-of-Hydro-Turbines-13.html
- [6] http://exor-eti.si/rezultati_iskanja/title-arhimed/#searchForm
- [7] Ciak d.o.o. (2015). "Elaborat zaštite okoliša za postupak ocjene o potrebi procjene utjecaja na okoliš za zahvat mala hidroelektrana Brestovac 150 kW". Zagreb, str. 4 - 7.
- [8] HYDRO POWER. "Technology - Big & Small Hydro Power - Tidal power - Wave Energy- Guidelines". <http://www.inforse.org/europe/dieret/Hydro/hydro.html>
- [9] ATB Sever (2008). "Low voltage three phase TEFC cage motors". Srbija, katalog.
- [10] Deprez, W.; Dexters, A.; Driesen, J.; Belmans, R. (2006), "Energy Efficiency of small Induction Machines: Comparison between Motor and Generator Mode", str. 1 - 6.
- [11] Gates MECTROL (2006). "Timing Belt Theory". U.S.A., katalog.

8 PRILOZI



Drawn By Bruno Turk	Checked By	Approved By - Date	File Name	Date 28.05.2016	Scale 1:100
RASPORED OPREME U STROJARNICI MALE HIDROELEKTRANE			mHe Brestovac		
			Međimursko veleučilište u Čakovcu		Sheet 1